

11

## Печатная антенная решетка VICTS с широкоугольным механоэлектрическим сканированием

© Е.А. Стригова<sup>1</sup>, Е.Е. Устюгов<sup>1</sup>, А.Д. Полигина<sup>2</sup>, С.В. Поленга<sup>1</sup>, А.В. Станковский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

<sup>2</sup> АО „Научно-производственное предприятие „Радиосвязь“, Красноярск, Россия

E-mail: ylitinskaya@gmail.com

Поступило в Редакцию 25 марта 2026 г.

В окончательной редакции 22 апреля 2026 г.

Принято к публикации 22 апреля 2026 г.

Разработана печатная антенная решетка VICTS с широкоугольным механоэлектрическим сканированием. Предложена конструкция печатной дифракционной антенной решетки толщиной менее 6.5 mm, обладающая широкоугольным механоэлектрическим сканированием в Ku-диапазоне частот. Проведен электродинамический анализ предложенной антенной решетки, получены диаграммы направленности при различных углах поворота излучающего слоя относительно возбуждающего слоя, исследованы особенности механоэлектрического сканирования. Показано, что разработанная печатная антенная решетка VICTS обеспечивает сканирование более чем на 75° от нормали к ее плоскости. Такая решетка может использоваться в терминалах спутниковой связи в движении, где требуются низкий профиль и широкоугольное сканирование, особенно в негеостационарных спутниковых системах.

**Ключевые слова:** антенная решетка, VICTS, сканирующая антенна, печатная антенна, SIW-технология, спутниковая связь.

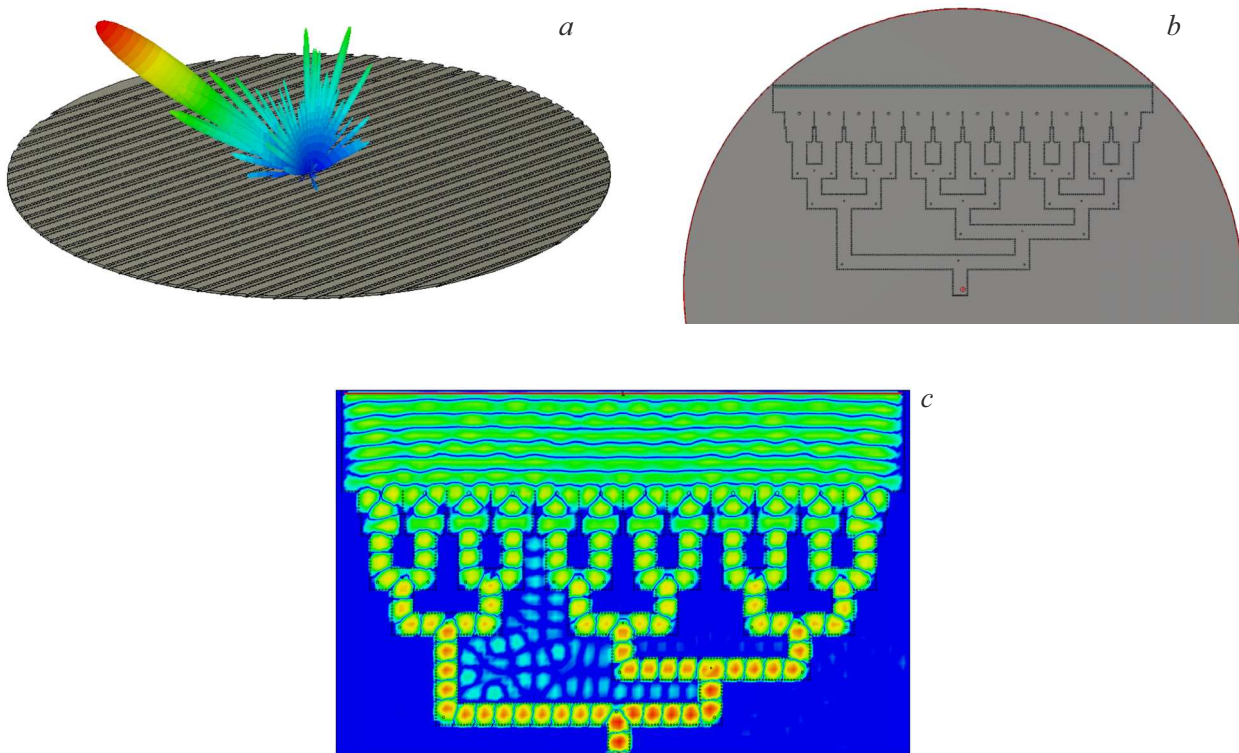
DOI: 10.61011/PJTF.2026.14.63310.20691

Развитие негеостационарных спутниковых группировок на низких и средних орбитах (LEO/MEO) является одним из ключевых направлений современной телекоммуникационной отрасли [1–3]. Такие системы способны обеспечить широкополосный доступ к информационным сервисам в любой точке земного шара, включая труднодоступные территории, лишенные наземной инфраструктуры [4]. Наземные терминалы для негеостационарных спутниковых сетей требуют антенных систем с широкоугольным сканированием луча для непрерывного слежения за быстро перемещающимися спутниками [5–7]. Среди существующих подходов к построению сканирующих антенн для спутниковых терминалов можно выделить три основных направления. Фазированные антенные решетки обеспечивают быстрое электронное сканирование, однако отличаются высокой стоимостью и малой доступностью компонентов, особенно в Ku- и Ka-диапазонах [8,9]. Антенные системы с механическим сканированием на основе зеркальных антенн или антенных решеток с опорно-поворотными устройствами являются более простым решением с точки зрения разработки антенн, но обладают большими габаритами и массой, а соответственно и ограниченной скоростью сканирования [10]. Третьим подходом к построению сканирующих антенн являются антенные системы с механоэлектрическим сканированием. Одним из возможных вариантов реализации подобного способа управления лучом является технология VICTS (Variable Inclination Continuous Transverse Stubs), предложенная Миллроем в 2005 г. [11], которая реализует механоэлектрическое сканирование без использования активных

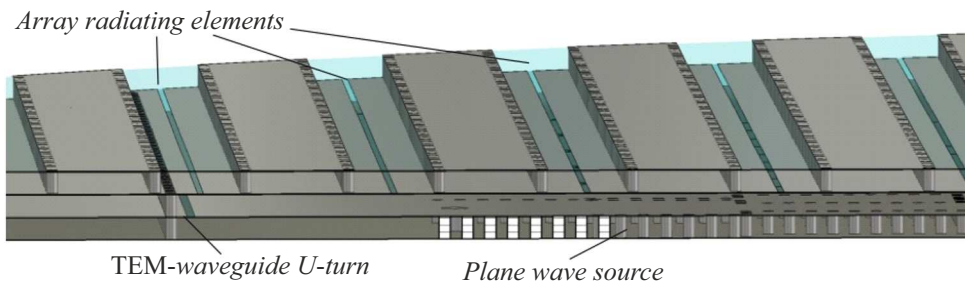
СВЧ-устройств за счет взаимного поворота излучающего и фидерного слоев антенны. Данный подход позволяет сочетать низкий профиль конструкции с широким сектором сканирования в угломестной плоскости при умеренной стоимости [12].

Антенна VICTS представляет собой два вращающихся диска. В верхнем диске располагается ряд протяженных щелевых излучателей. В нижнем (фидерном) диске находится волноводная диаграммообразующая схема (ДОС) на бинарных делителях мощности в  $H$ -плоскости, которая формирует на выходе делителя квази-ТЕМ-волну для возбуждения излучателей, находящихся в верхнем диске антенны. Антенна изготавливается методом фрезерования из алюминия. Как показали результаты расчетных и экспериментальных исследований, цельнометаллическая антенна VICTS Ku-диапазона диаметром 500 mm обеспечивает сектор сканирования луча более 60° относительно нормали при умеренной деградации коэффициента усиления, при этом высота профиля антенны составляла около 40 mm [13]. Вместе с тем цельнометаллическая реализация обладает рядом существенных ограничений: значительная трудоемкость и стоимость механической обработки сложных элементов (замедляющей структуры, волноводного делителя мощности), значительная масса конструкции, жесткие требования к допускам при производстве и сложность масштабирования для серийного производства.

В настоящей работе предлагается альтернативный подход к реализации антенной решетки типа VICTS на основе технологии изготовления печатных плат. Такой подход позволяет существенно снизить профиль



**Рис. 1.** Антенная система. *a* — внешний вид антенной системы с диаграммой направленности, *b* — ДЭС, *c* — распределение поля в ДЭС.



**Рис. 2.** Структура антенной решетки.

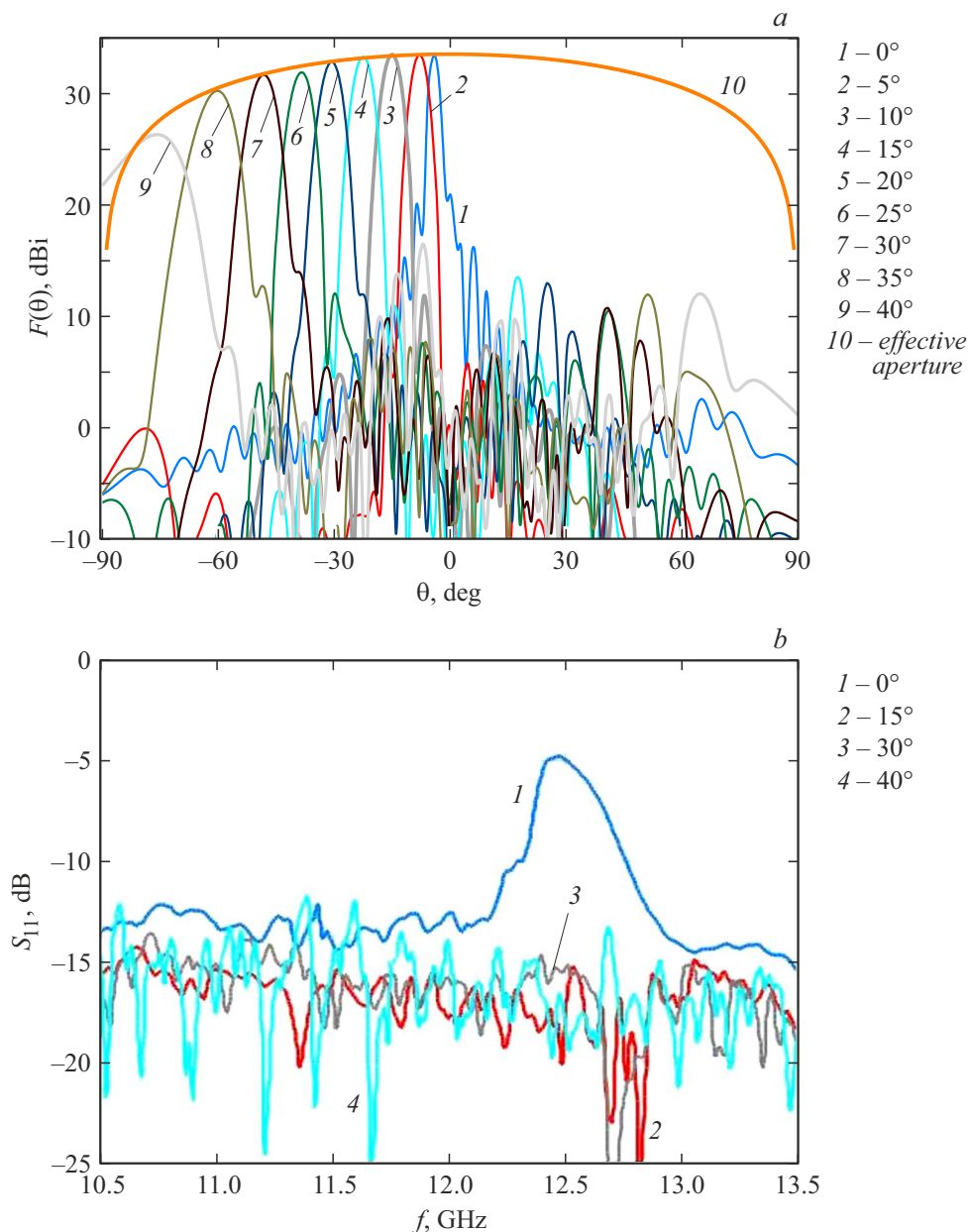
антенны, стоимость реализации, обеспечить высокую воспроизводимость параметров за счет стандартных технологических процессов, а также открывает возможности для интеграции антенны с другими функциональными компонентами приемного тракта (фильтрами, маломощным усилителем и др.) [14,15]. При этом переход к печатному исполнению сопряжен с рядом трудностей: дополнительные потери в диэлектрическом материале подложек, ограничения технологии изготовления печатных плат.

Целью настоящей работы является разработка и исследование печатной антенной решетки типа VICTS с широкоугольным механоэлектрическим сканированием.

Как и при цельнометаллической реализации, печатная антенна VICTS состоит из двух дисков: верхнего излучающего и нижнего фидерного (рис. 1, *a*). Сканирование в

угломестной плоскости осуществляется путем поворота верхнего диска относительно нижнего — источника плоской волны. Синхронным поворотом двух дисков осуществляется сканирование по азимуту. Для реализации печатной антенны VICTS в качестве диэлектрической подложки был выбран материал на основе фторопласта — Rogers 5880 толщиной 2 mm с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2.2$ , малым тангенсом угла диэлектрических потерь ( $\tan \delta = 0.0009$ ) и шероховатостью медной фольги ( $R_a = 0.3 \mu\text{m}$ ), что обеспечивает низкие потери и низкий коэффициент трения между дисками. Диаметр антенны составил 500 mm.

В нижнем диске антенны расположена ДЭС, формирующая квази-ТЕМ-волну для возбуждения щелевых излучателей в верхнем диске антенны. Источник плоской волны реализован на основе бинарных дели-



**Рис. 3.** Расчетные характеристики. *a* — сечения диаграмм направленности в угломерной плоскости при различных углах поворота диска с излучателями на частоте 12 GHz; *b* — частотные зависимости коэффициента отражения при различных углах поворота диска с излучателями; *c* — частотные зависимости коэффициента направленного действия при различных углах поворота диска с излучателями. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

телей мощности, выполненных по технологии волновода, интегрированного в подложку (substrate integrated waveguide, SIW) (рис. 1, *b*). Источник состоит из 12 ступенчатых рупоров с делителем апертury в раскрытие. Длина источника составила 340 mm. Для формирования равномерного амплитудно-фазового распределения поля были использованы неравноамплитудные делители мощности. В связи с тем, что к части излучателей источника плоской волны питание подводится через три бинарных делителя, а к части — через четыре, уделено особое внимание фазировке излучателей. Разность фаз между

излучателями в рабочей полосе частот не превышает 5°.

Распределение поля в делителе показано на рис. 1, *c*.

Для надежного экранирования SIW-волноводов и предотвращения паразитных связей между соседними каналами делителей необходимо корректно выбрать диаметр металлизированных отверстий ( $d$ ) — 1 mm — и шаг между ними ( $p$ ), шаг варьируется от 2 до 3.5 mm в зависимости от места расположения. Для обеспечения работы антенны в широкой полосе частот в структуру делителей введены согласующие неоднородности в виде металлизированных отверстий внутри делителей.

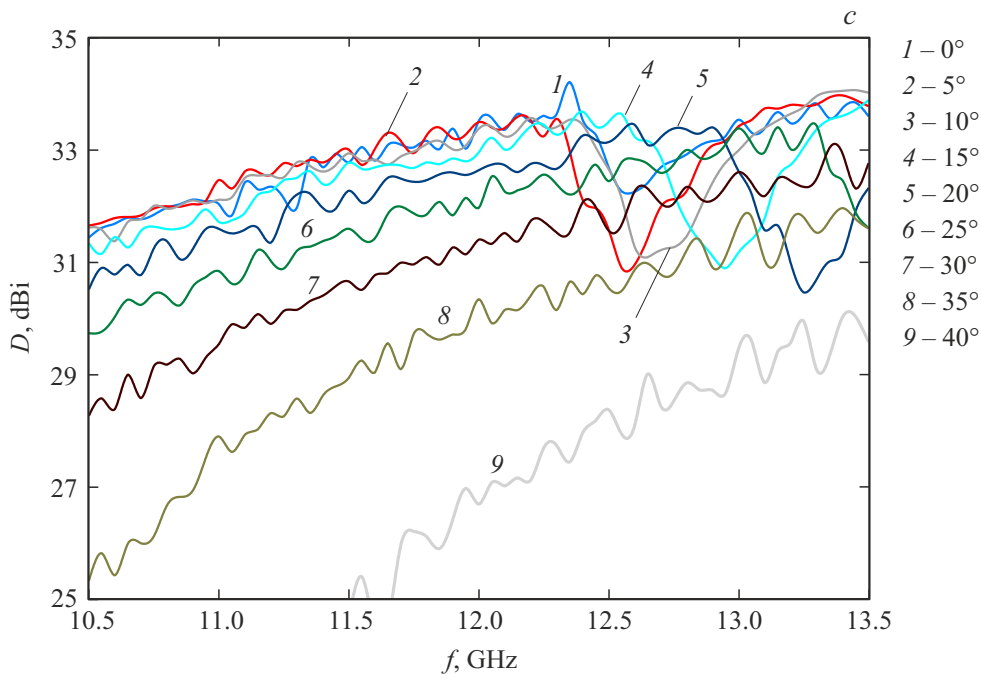


Рис. 3 (продолжение).

Связь слоя с ДОС и слоя с излучателями осуществляется при помощи щелевого перехода (рис. 2). Коэффициент отражения такого перехода не превышает  $-20$  дБ в полосе частот 50%. Ряд металлизированных отверстий может не касаться металлизации со стороны излучателей, что необходимо для осуществления вращения одного диска относительно другого. Зазор в 0.2 мм обеспечивает утечку мощности возбуждающего колебания в нежелательном направлении на уровне 0.2 дБ.

Излучающий слой антенны выполнен в виде ступенчатых рупоров (рис. 2), боковые стенки которых сформированы при помощи металлизированных отверстий. Ширины щелей связи увеличиваются по мере удаления от источника плоской волны для получения амплитудного распределения, близкого к равномерному.

Были проведены численные исследования рассматриваемой антенной решетки методом конечных элементов во временной области. На рис. 3, а показаны сечения диаграмм направленности исследуемой антенной решеткой в угломестной плоскости при углах поворота диска с источником плоской волны от  $0$  до  $40^\circ$  на частоте 12 ГГц. Следует отметить, что при повороте диска с ДОС сканирование происходит не только в угломестной плоскости, но и в азимутальной, что вызвано изменением эффективного шага решетки. Для построения семейства диаграмм направленности находилось сечение через максимум для каждого из углов поворота диска с источником. Снижение направленности хорошо коррелирует с уменьшением эффективной апертуры антенны (кривая *effective aperture* на рис. 3, а соответствует коэффициенту использования поверхности 60%) вплоть до отклонения луча на  $80^\circ$ . Худшее значение коэф-

фициента отражения  $-5$  дБ на верхней частоте рабочего диапазона (рис. 3, б) наблюдается при расположении источника строго параллельно излучателям, в этом случае отраженный сигнал от излучателей возвращается в источник в фазе. При повороте источника относительно излучателей коэффициент отражения улучшается до уровня  $-15$  дБ и характеристика приобретает линейный характер во всей рабочей полосе частот.

За счет последовательного питания излучателей решеткой антенна обладает частотным сканированием. Луч может быть направлен перпендикулярно антенной решетке только на одной частоте. Это приводит к появлению в диапазоне рабочих частот слепой зоны по нормали к антенне, куда луч не может быть направлен ни при каких комбинациях положений дисков антенны. Антенна демонстрирует монотонное увеличение коэффициента направленного действия (рис. 3, в) в диапазоне частот 10.5–12.3 ГГц, на частоте 12.5 ГГц луч антенной решетки переходит через „нуль“ (перпендикуляр к плоскости антенны) и наблюдается снижение коэффициента направленного действия и ухудшение коэффициента отражения, характерного для антенных решеток с последовательным питанием. Критерием диапазона рабочих частот разработанной антенны типа VICTS может служить размер слепой зоны. Для слепой зоны  $\pm 5^\circ$  диапазон рабочих частот составляет 12–12.5 ГГц ( $\sim 4\%$ ), для  $10^\circ$  — 11.35–12.5 ГГц ( $\sim 10\%$ ). Если допустить деградацию коэффициента направленного действия вблизи нулевого отклонения на 2 дБ (12.5 ГГц), то полоса рабочих частот может быть увеличена вдвое.

Коэффициент направленного действия печатного варианта антенной решетки сопоставим с таковым для

цельнометаллической реализации. Однако в ДОС печатного варианта расчетные потери составляют 1 dB, что на 0.7 dB больше, чем в случае пустотелого варианта. В остальной части решетки потери возросли незначительно (не более чем на 0.3 dB). Использование источника плоской волны на основе интегрированного в подложку параболического рефлектора позволит снизить потери в ДОС на 0.5 dB, однако апертурный коэффициент использования поверхности антенны будет снижен за счет спадающего амплитудного распределения.

Предложенная печатная антенна VICTS позволяет осуществлять широкоугольное механоэлектрическое сканирование. Преимуществом предлагаемого решения является дешевизна исполнения из-за отсутствия активных СВЧ-элементов. Скорость сканирования у представленной антенной системы потенциально более высокая, чем в случае использования чисто механического метода. Это связано с тем, что в рассмотренной антенне производится вращение сбалансированных дисков вокруг своей оси, а не двухосевое вращение всей антенной системы.

По совокупности характеристик концепция печатной антенны VICTS хорошо подходит для использования в системах спутниковой связи на основе негеостационарных спутников с сектором сканирования  $\pm 60^\circ$  относительно зенита, а также для задач локации.

### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-10205).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *The rise of LEO mega-constellations: Shaping the future of SatCom* [Электронный ресурс]. <https://www.magister.fi/leo-satellite-constellations-satcom/> (дата обращения: 11.03.2026).
- [2] *The new age of Large Low Earth Orbit Satellite Constellations* [Электронный ресурс]. <https://www.spacer1.com/wp-content/uploads/2020/09/The-new-age-of-Large-Low-Earth-Orbit-Satellite-Constellations.pdf> (дата обращения: 11.03.2026).
- [3] *Non-geostationary satellite systems* [Электронный ресурс]. <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/Non-geostationary-satellite-systems.aspx> (дата обращения: 11.03.2026).
- [4] *LEO satellite providers service plans* [Электронный ресурс]. [https://telehealthtechnology.org/innovation\\_watch/leo-satellite-providers-service-plans/](https://telehealthtechnology.org/innovation_watch/leo-satellite-providers-service-plans/) (дата обращения: 11.03.2026).
- [5] J. Zheng, T.H. Luan, G. Li, J. Zhao, Z. Yin, N. Cheng, J. Pan, *IEEE Network*, **40** (2), 295 (2026). DOI: 10.1109/MNET.2025.3572141
- [6] С.Н. Борисов, В.В. Денисенко, Б.А. Левитан, А.В. Шишлов, *Радиотехника*, № 10, 17 (2015).
- [7] H. Al-Hraishawi, H. Chougrani, S. Kisseleff, E. Lagunas, S. Chatzinotas, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, **25** (1), 101 (2023). DOI: 10.1109/COMST.2022.3197695
- [8] Z. Xie, Y. Feng, B. Huang, Z. Zhang, H. Zhao, L. Liu, Z. Liu, Z. Li, X. Wu, *IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Briefs*, **72** (7), 893 (2025). DOI: 10.1109/TCSII.2025.3578020
- [9] В.Р. Анпилогов, В.В. Денисенко, И.В. Зимин, Ю.В. Кривошеев, Ю.Н. Чекушкин, А.В. Шишлов, *Первая миля*, № 3 (80), 16 (2019). DOI: 10.22184/2070-8963.2019.80.3.16.27
- [10] В.Д. Бурцев, С.Ю. Прохоров, А.В. Никулин, Г.В. Антошкин, Т.С. Вошева, А.П. Седов, Р.В. Горюнов, Д.С. Филонов, *Наноиндустрия*, **18**, 902 (2025). DOI: 10.22184/1993-8578.2025.18.11s.902.905
- [11] W.W. Milroy, S.B. Coppedge, A.C. Lemons, *Variable inclination continuous transverse stub array*, patent US 6919854 (2005).
- [12] S.Y. Liu, C.F. Zhou, J. Liu, J.H. Fu, Q. Wu, X.M. Ding, *IEEE Open J. Antennas Propag.*, **3**, 1218 (2022). DOI: 10.1109/OJAP.2022.3212754
- [13] Е.А. Стригова, С.В. Поленга, А.В. Станковский, А.Д. Полигина, *Электромагнитные волны и электронные системы*, **30** (2), 64 (2025). DOI: 10.18127/j5604128-202502-07
- [14] В.В. Денисенко, В.Н. Козлов, Р.А. Колесников, Ю.Б. Корчемкин, Ю.В. Кривошеев, Б.А. Левитан, А.М. Шитиков, А.В. Шишлов, З.А. Янукьян, М.С. Uhm, S.H. Yun, *Радиотехника*, **85** (10), 42 (2021). DOI: 10.18127/j00338486-202110-05
- [15] P. Lohmannia, M. Kamyab, A.R. Nikkhah, R. Rezaiesarlak, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, **11**, 1434 (2012). DOI: 10.1109/LAWP.2012.2229101